

我国大气 PM_{2.5} 化学成分对人群健康影响的研究进展

唐大镜^{1,2}, 孙成瑶^{1,2}, 陈风格^{1,3}, 赵川^{2,4}, 关茗洋^{1,3}

1. 石家庄市疾病预防控制中心, 河北 石家庄 050011
2. 华北理工大学公共卫生学院, 河北 唐山 063210
3. 中国疾病预防控制中心环境与健康研究基地(石家庄), 河北 石家庄 050011
4. 石家庄市第四医院, 河北 石家庄 050011



DOI 10.11836/JEOM22008

摘要:

大气污染一直以来是威胁人群健康的重要因素,随着我国城市化进程的加快,空气污染所带来的危害越来越严重。大量科学研究显示,大气 PM_{2.5} 中的一些化学成分与人体健康损害有着紧密的关联。本文分别从大气 PM_{2.5} 化学成分对人群死亡效应、发病效应、生殖发育以及对人体生理指标或生物标志物影响等不同的健康结局进行阐述,回顾了我国大气 PM_{2.5} 化学成分对人群健康研究的进展,总结目前研究中存在的不足之处,以期后续相关研究提供参考依据。

关键词: 大气污染; 细颗粒物; 化学成分; 健康影响

Research progress on adverse health effects of fine particulate matter constituents in China

TANG Dajing^{1,2}, SUN Chengyao^{1,2}, CHEN Fengge^{1,3}, ZHAO Chuan^{2,4}, GUAN Mingyang^{1,3} (1. Shijiazhuang Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang, Hebei 050011, China; 2. School of Public Health, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China; 3. Research Base for Environment and Health in Shijiazhuang, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Shijiazhuang, Hebei 050011, China; 4. The Fourth Hospital of Shijiazhuang, Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract:

Air pollution has always been an important factor threatening population health, and with the acceleration of urbanization in China, the adverse health effects associated with air pollution is becoming more and more serious. Numerous scientific studies have shown that chemical components of fine particulate matter are closely related to human health damage. This paper elaborated reported human health outcomes of PM_{2.5} chemical components, including fatality, morbidity, reproduction & development, and physiological indexes or biomarkers, reviewed the research progress of PM_{2.5} chemical constituents on human health in China, and summarized the deficiencies of current research, aiming to provide useful clues for future relevant studies.

Keywords: air pollution; fine particulate matter; chemical component; health impact

作者简介

唐大镜(1994—),女,硕士生;
E-mail: 1097272631@qq.com

通信作者

关茗洋, E-mail: gmyguan@qq.com

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2022-01-16

录用日期 2022-06-13

文章编号 2095-9982(2022)08-0942-07

中图分类号 R122

文献标志码 A

►引用

唐大镜, 孙成瑶, 陈风格, 等. 我国大气 PM_{2.5} 化学成分对人群健康影响的研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2022, 39(8): 942-948.

►本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM22008

Correspondence to

GUAN Mingyang, E-mail: gmyguan@qq.com

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2022-01-16

Accepted 2022-06-13

► To cite

TANG Dajing, SUN Chengyao, CHEN Fengge, et al. Research progress on adverse health effects of fine particulate matter constituents in China [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2022, 39(8): 942-948.

► Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM22008

既往流行病学研究显示,大气细颗粒物(fine particulate matter with median aerodynamic diameter $\leq 2.5 \mu\text{m}$, PM_{2.5})可对人群健康产生不利影响,尤其是心血管系统疾病和呼吸系统疾病^[1-3]。PM_{2.5} 粒径小,比表面积大,其表面容易附着各类不同毒性成分,如碳组分[元素碳(elemental carbon, EC)和有机碳(organic carbon, OC)等]、重金属[钾(K)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)等]、水溶性离子[硫酸盐(SO₄²⁻)、硝酸盐(NO₃⁻)、铵盐(NH₄⁺)等]以及有机物(多环芳烃等)等,并且能够通过远距离传输对人体造成危害^[4-5]。由于 PM_{2.5} 中化学成分的组成和浓度在不同地区或时间有所差异,以至于 PM_{2.5} 对人群健康的影响具有明显的空间异质性和时间差异性。因此,明确 PM_{2.5} 的有毒成分不仅有助于相关部门制定具体减排措施,并且对于了解 PM_{2.5} 对人群健康影响的生物学机制至关重要。近年来,一系列研究报告了 PM_{2.5} 各种成分与健康结局之间的关联。例如,主要

来自燃烧源的 EC 或黑碳 (black carbon, BC) 与心血管和呼吸系统疾病的住院和死亡有关^[6-7]; 作为生物质燃烧指标的 K 与心血管和呼吸系统疾病的发病风险有关^[8-9]; 钒(V)、镍(Ni)与全死因死亡率和心血管系统疾病死亡率增加显著相关^[10-11]; 以及 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等二次污染物也被发现与心血管系统疾病和呼吸系统疾病有关^[12-14]。在过去的几十年里,我国关于 $\text{PM}_{2.5}$ 成分对健康影响的研究不断积累,但在不同时期和地区的研究结果有所不同。因此,本研究对我国 $\text{PM}_{2.5}$ 不同成分对人群不良健康结局(死亡效应、发病效应等)的影响进行回顾与综述,对于制定有效的公共卫生防治策略和措施、降低大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染对人群健康危害,提高人群生活质量提供参考依据。

1 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分对人群死亡的影响

1.1 短期效应

2012 年, Cao 等^[15]首次探讨我国 $\text{PM}_{2.5}$ 成分对人群健康的影响,该团队分析了西安市 2004—2008 年期间每日死亡数据与 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分(OC、EC)、10 种水溶性离子 [钠离子(Na^+)、 NH_4^+ 、钾离子(K^+)、氟离子(F^-) 等] 以及 15 种元素 [硫(S)、氯(Cl)、K、钙(Ca)、砷(As) 等] 之间的联系。结果表明, OC、EC、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、Cl、Ni 浓度升高均可能会增加全死因、心血管系统疾病和呼吸系统疾病死亡率, Mg^{2+} 与心血管和呼吸系统疾病死亡率以及 S、As 与全死亡和心血管系统疾病死亡率呈正相关, 而 K^+ 仅与全死因死亡率增加显著相关。随后,西安市又开展了一项关于 $\text{PM}_{2.5}$ 及其化学成分(OC、EC、S、K、Cl、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等 17 种成分)与死亡风险关系的时间序列分析^[16], 在全年分析的基础上,除 S 与呼吸系统疾病死亡率, OC、EC、Cl、K 与冠心病死亡率增加显著相关外,其他成分对该地区人群死亡效应均无统计学意义; 通过以采暖期、非采暖分层分析后发现在采暖期观察到更强的效应,如 EC、S、Cl、Cr、Ni、Pb 对全死因、心血管系统疾病以及呼吸系统疾病死亡率的影响更大。对比上述两个团队的研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 成分对人群健康的影响受研究时期及研究人群的影响较大, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 成分与人群健康的潜在季节性影响值得进一步研究。

目前,关于大气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分对我国人群死亡效应的影响,研究范围最为广泛当属暨南大学研究团队 Yang 等^[17]基于 2011—2013 年全国 133 个地区每日 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC、EC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度对人群死亡率影响的时间序列分析。结果表明,所研究的 5 种成分

与全死因死亡率、心血管系统疾病死亡率增加均显著相关,并且对心血管系统疾病死亡率影响的效应值高于全死因死亡率; 而呼吸系统疾病死亡率仅与碳组分(OC、EC)有关。进一步分层分析发现, $\text{PM}_{2.5}$ 各成分对老年人(≥ 75 岁)的死亡风险更高,不同性别对死亡的影响无显著性差异。Lin 等^[18]基于 2007—2009 年广州市人群每日死亡情况以及 $\text{PM}_{2.5}$ 成分数据,研究该地区碳组分(OC、EC)、5 种水溶性离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 Na^+)对心血管系统疾病的影响。结果与 Yang 等^[17]一致, OC、EC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度升高均会导致心血管系统疾病死亡率增加。同样, Wang 等^[19]分析了 2013—2015 年上海市不同死因死亡率与上述 5 种成分之间的关系。与 Yang 等^[17]研究结果不同的是, SO_4^{2-} 与心血管系统疾病死亡率无显著相关性,并且发现除碳组分外, NO_3^- 、 NH_4^+ 与呼吸系统疾病死亡率也存在显著相关性。Wang 等^[20]分析了上海市每日心血管系统疾病死亡率与 $\text{PM}_{2.5}$ 成分(包括碳组分、8 种水溶性无机离子和 15 种金属元素)之间的关系,也得出了相似的结论。此外,还发现 K、铜(Cu)、As 和 Pb 浓度升高也可能会导致心血管系统疾病死亡率显著增加。综合上述研究发现,不同城市或者是同一城市不同团队所得研究结论有所差异,可能与各地区人口学特征不一、 $\text{PM}_{2.5}$ 污染来源及其成分的含量不同、以及研究设计和暴露评估方法不一致有关。

2019 年, Chen 等^[21]分析了北京市人群死亡率与 $\text{PM}_{2.5}$ 中 7 种成分 [OC、EC、 Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、镁离子(Mg^{2+})、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}] 之间的关系,研究发现各成分与全死因死亡率的相关性均无统计学意义, OC、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与呼吸系统疾病死亡率均呈正相关, 仅 SO_4^{2-} 与心血管系统疾病死亡率呈正相关。通过季节分层分析发现,冷季 $\text{PM}_{2.5}$ 成分与死亡率之间的相关性相对更强。Chen 等^[21]所得结论与 Wang 等^[19]在上海的研究结果有所差异,相较上海而言,北京冬季温度低,静稳天气较多,不利于污染物扩散,且在采暖期间集中供暖,增加了煤的使用量, SO_4^{2-} 的气态前体物 SO_2 排放量增加,进而导致 SO_4^{2-} 的浓度升高。

1.2 长期效应

尽管对于我国 $\text{PM}_{2.5}$ 成分与人群死亡率之间关系的研究愈来愈多,但以短期效应研究居多,并且多数都选择大城市作为研究地点。Chen 等^[22]基于华东地区一群农村成年人进行了一项为期 12 年的队列研究,探讨长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 及其成分与死亡风险的关系。结果显示, BC、OC、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 与全死因死亡率

显著相关;对于特定原因死亡率,BC、 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 可能会增加心血管系统疾病、癌症死亡率,而EC仅与心血管系统疾病死亡率增加显著相关;通过分层分析发现,男性和曾经吸烟者暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 及其成分有更高的死亡风险。该项研究关于长期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 成分对农村成年人死亡风险的影响所得结果与暨南大学研究团队^[17]在全国范围内开展的时间序列研究所得结果类似,但在不同性别分层分析中结论有所不同。研究表明吸烟会对呼吸和心血管系统造成重大损害,这可能导致吸烟者对空气污染相对更敏感^[23]。因此,Chen等^[22]观察到的性别效应改变可能是由于男性吸烟行为所导致的性别差异。

2 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分对呼吸系统的影响

2.1 对呼吸系统疾病发病的影响

我国学者们对于 $\text{PM}_{2.5}$ 成分与人群健康之间关系的各类研究中,以对呼吸系统危害的最为多见,且以短期效应研究为主。譬如,Wang等^[24]分析我国台湾台北市 $\text{PM}_{2.5}$ 成分对急诊就诊量的影响发现,急诊总就诊量、呼吸系统疾病急诊就诊量增加与OC、EC、 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 的浓度显著正相关。洪也等^[25]分析沈阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子对呼吸系统疾病门诊就诊人数的影响,结果表明 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 浓度升高均可导致呼吸系统疾病日门诊就诊人数增加。Guo等^[26]探讨了广州地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中39种化学成分(16种多环芳烃、4种水溶性无机离子、26种金属及类金属)对呼吸系统疾病急诊就诊量的短期影响,研究表明 $\text{PM}_{2.5}$ 成分对呼吸系统疾病的影响均无统计学意义,但值得注意的是蒽、芘、Cu、 NO_3^- 、苯并(k)荧蒽和茚并(1,2,3-cd)芘是呼吸系统疾病发生的重要解释因子。关于 $\text{PM}_{2.5}$ 中多环芳烃对人群健康影响的流行病学证据十分有限,未来需进行更多的相关研究。

2.2 对肺功能生理指标的影响

$\text{PM}_{2.5}$ 的暴露与呼吸系统疾病的发生密切相关,由于其表面附着大量的重金属、多环芳烃类等有毒有害物质,导致肺部的氧化应激和炎症反应从而影响肺功能。复旦大学阚海东团队开展了一系列 $\text{PM}_{2.5}$ 成分与肺功能之间关系的研究。如,一项基于慢性阻塞性肺疾病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)患者的定群研究发现,OC、EC、 NO_3^- 和 NH_4^+ 可能是 $\text{PM}_{2.5}$ 导致COPD患者气道炎症反应标志物一氧化氮合成酶2A(nitric oxide synthase 2A, NOS2A)DNA甲基化降低和呼出气一氧化氮(fractional exhaled nitric oxide,

FeNO)升高的主要原因^[27]。另一项基于健康成人的研究也得出了一致的结论,研究结果显示EC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 浓度升高也可导致气道炎症反应标志物FeNO增加^[28]。Chen等^[29]进行了一项针对COPD患者的定群研究,应用线性混合效应模型结合分布滞后模型探索上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 中10种主要成分(包括OC、EC、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})对肺功能的短期影响。研究表明,短期暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 与肺功能下降显著相关,而 $\text{PM}_{2.5}$ 中EC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 可能是造成肺功能下降的主要原因。以上研究为探索空气污染对肺功能的急性影响提供了数据支持,但由于其样本量小或者研究对象为特殊人群,因此未来需要更多群体和更大样本量的研究来评估个体暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 各成分对肺功能的影响,以验证上述结论的准确性。

Yang等^[30]开展了一项全国性的横断面研究,于2012—2015年期间在我国六个主要地理区域(西北、北部、东北、西南、中南、东部)对20岁及以上的成年人进行了抽样调查,以评估长期接触 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要成分与中国肺健康研究中一系列肺功能指标的相关性。研究发现, $\text{PM}_{2.5}$ 中有机物(organic matter, OM)、BC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 与大多数肺功能指标[如3秒用力呼气量(FEV_3)、6秒用力呼气量(FEV_6)、 $\text{FEV}_3/\text{FEV}_6$ 等]呈显著负相关。该研究是我国第一项探索长期接触 $\text{PM}_{2.5}$ 成分与一系列肺功能指标之间关系的大规模调查,表明长期接触 $\text{PM}_{2.5}$ 中某些成分,特别是OM和 NO_3^- ,可能会对肺功能产生更大的损害。因此,有必要进行更多前瞻性队列研究,以进一步明确 $\text{PM}_{2.5}$ 中各种成分对肺功能的长期影响。

3 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分对心血管系统的影响

3.1 对心血管系统疾病发病的影响

研究表明, $\text{PM}_{2.5}$ 可通过诱导炎症反应和氧化应激作用、内皮细胞功能障碍、心脏功能改变、自主神经调节异常等机制影响心血管系统疾病的发生发展^[31]。Guo等^[26]通过分析广州地区 $\text{PM}_{2.5}$ 中化学成分对心血管系统疾病急诊就诊量的短期影响,发现在所研究的39种化学成分中仅蒽与心血管系统疾病急诊就诊量增加有关。随后,陈晨等^[32]探讨北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分短期暴露对人群心脑血管住院风险的影响,研究发现OC、EC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 NH_4^+ 短期暴露均可导致心血管疾病住院风险的增加。

除此之外,暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 可能会增加怀孕期间孕妇的血压和患高血压的风险^[33-34]。然而, $\text{PM}_{2.5}$ 化学成

分是否会引起孕妇不同程度的血压变化及其可能的机制尚不清楚。基于一项母婴出生队列的定群研究, Xia 等^[35]评估了孕妇暴露于 $PM_{2.5}$ 及其 19 种化学成分与血压变化和潜在敏感窗口之间的关系。研究表明 $PM_{2.5}$ 暴露与妊娠早期收缩压、舒张压和平均动脉压的升高显著相关, 提示妊娠早期可能是 $PM_{2.5}$ 暴露的敏感窗口; 在校正 $PM_{2.5}$ 总质量后, 发现 $PM_{2.5}$ 中 Pb 浓度升高与舒张压和平均动脉压增加相关, 而 Ca、铝 (Al) 和钛 (Ti) 浓度与舒张压显著负相关。虽然先前的研究表明, 在健康青少年中暴露于 $PM_{2.5}$ 中的 Ca、Al 和 Ti 与舒张压呈负相关^[36], 但这 3 种成分与孕妇舒张压之间的负相关关系是否有意义还需要未来更多的队列研究来证实。

3.2 对心血管疾病亚临床指标的影响

北京大学研究团队^[37]基于 40 名健康大学生开展了短期暴露于 $PM_{2.5}$ 成分 [OC、EC 等 5 种碳组分, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等 4 种负离子, Al、铁 (Fe)、As 等 23 种金属/类金属] 与动脉粥样硬化氧化应激效应的研究, 结果表明 Cl^- 、Sr、Fe、Ni 与血浆氧化型低密度脂蛋白显著相关, Ca、Mg、Ti、Ni、As 浓度的升高可能会使白细胞分化抗原 36 增加。氧化型低密度脂蛋白、白细胞分化抗原 36 是氧化应激的生物标记物和促进剂, 与动脉粥样硬化的发生发展密切相关。随后, 该团队进一步探讨 $PM_{2.5}$ 成分与血管内皮功能损伤之间的关系发现, 锶 (Sr)、Fe、Ti、钴 (Co)、Mg 均与内皮素-1 增加显著相关, 锰 (Mn)、K 与细胞黏附因子-1 显著正相关, 未发现 E-选择素、血管细胞黏附因子-1 与 $PM_{2.5}$ 成分的显著正向效应^[38]。内皮素-1、E-选择素、细胞黏附因子-1、血管细胞黏附因子-1 与血管内皮功能损伤密切相关, 这些生物标志物水平的增加可能会导致动脉粥样硬化和心血管疾病的风险增加。该团队的研究为 $PM_{2.5}$ 导致动脉粥样硬化氧化应激增加、血管内皮功能损伤背后的关键成分提供了参考依据。

Du 等^[39]基于 2017—2019 年期间参加我国空气污染亚临床结局 (Sub-Clinical Outcome of Polluted Air, SCOPA) 研究队列中的 5852 名中国成年人进行了一项多中心研究, 评估我国 $PM_{2.5}$ 及其化学成分 (OM、BC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+) 与心血管疾病亚临床指标, 包括血压、空腹血糖和心电图测量的相关性。研究表明, OM、BC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 与空腹血糖、舒张压和所有心电图参数 [如激动经心房、房室结、房室束而达心室所需的时间 (PR 间期), 心室除极和复极激动时间 (QT 间期) 延长等] 均呈显著正相关; 其中, OM 与空腹血糖、

NO_3^- 、 NH_4^+ 与舒张压和心电图参数的相关性相对更强。既往 Wu 等^[36]也报道称 OM、BC、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 与舒张压显著相关, Lin 等^[40]研究表明 NO_3^- 、 NH_4^+ 与血压升高密切相关。然而, Du 等^[39]的研究未观察到 $PM_{2.5}$ 成分与收缩压之间存在正相关关系。这种差异可能是由于不同的研究设计、研究参与者和暴露测量的不同所致, 由于目前研究的样本量相对较小, 根本原因很难确定, 应在进一步研究中进行更大规模的研究。此外, Du 等^[39]研究发现 $PM_{2.5}$ 成分与心电图参数之间有很强的相关性, 提示 $PM_{2.5}$ 成分可能会引起房室传导延迟、心室除极和复极。但 $PM_{2.5}$ 成分如何导致 PR、心室除极的全过程 (QRS)、QT 和按心率校正的 QT 间期 (QTC) 间期改变的确切机制仍不清楚, 需要进一步的流行病学和实验研究来证实该结论。综上所述, OM、 NO_3^- 、 NH_4^+ 可能是 $PM_{2.5}$ 导致心血管疾病亚临床结局的主要因素, 该研究可能为 $PM_{2.5}$ 对心血管疾病影响的生物学途径提供新的线索。

4 大气 $PM_{2.5}$ 化学成分对神经系统的影响

4.1 对神经系统疾病发病的影响

动物实验和流行病学研究均表明 $PM_{2.5}$ 中的有害成分可对中枢神经系统造成损伤, 但由于 $PM_{2.5}$ 的化学成分组成复杂、理化性质特殊, 目前关于 $PM_{2.5}$ 中有害组分对机体神经系统的生物学损害机制仍需进一步研究。Chen 等^[41]在我国台湾进行了一项时间序列研究, 以评估 $PM_{2.5}$ 及其成分 (OC、EC、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-}) 对缺血性和出血性卒中急诊就诊量的影响。研究结果显示, 仅 EC、 NH_4^+ 与出血性卒中的急诊就诊量呈正相关, 其他成分与卒中均无统计学关联。此外, 一项在广州地区进行的关于 $PM_{2.5}$ 化学成分对神经系统疾病影响的研究发现, V 和 Co 可能与神经系统疾病就诊量增加显著相关^[26]。

4.2 对神经系统功能障碍的影响

空气污染可对神经发育产生不利影响, 导致神经系统功能障碍, 进而会对人们的神经行为产生影响。中南大学研究团队对我国五所高校 (分别来自长沙、武汉、厦门、乌鲁木齐和呼和浩特) 的大一新生进行了一项回顾性队列研究, 探讨入学前六年长期暴露于 $PM_{2.5}$ 中 BC 与大学生抑郁、焦虑症状之间的关系^[42]。研究表明, BC 暴露仅与抑郁症状显著相关, 且这种关系受性别和教育程度的影响。该研究填补了我国 $PM_{2.5}$ 中 BC 对青少年和年轻人心理健康影响的空白, 但该结论不能完全推广至其他人群。Shi 等^[43]在京津

冀地区的九个城市对 40~89 岁中老年人进行了一项多中心横断面研究,以评估 $PM_{2.5}$ 及其化学成分 [EC、OC、K、硅(Si)、Cu、Cd、Ni、Ti、锌(Zn)、As、Pb] 对焦虑和抑郁的影响。研究结果显示,OC、EC、Cu、Cd、Ni、Zn 与焦虑和抑郁均显著相关;其中,EC 和 Ni 对焦虑的影响较大,OC 和 EC 对抑郁的影响较大。该研究为今后探讨我国 $PM_{2.5}$ 成分与中老年人精神障碍(即焦虑和抑郁)之间的联系提供参考依据。上述研究中对于焦虑和抑郁的测量结果都是基于患者健康问卷(Patient Health Questionnaire-9, PHQ-9)和广泛性焦虑量表(Generalized Anxiety Disorder, GAD-7)调查所得,而不是临床诊断,可能会增加结果的不确定性。因此,需要进一步的前瞻性研究来证实 $PM_{2.5}$ 化学成分与抑郁和焦虑之间的因果关系。

5 大气 $PM_{2.5}$ 化学成分对其他系统的影响

5.1 对男性不育的影响

不孕不育作为生殖系统的一种常见疾病,是一个全球性的公共卫生问题。精液质量差是男性不育最常见的原因之一。2019 年 Huang 等^[44]调查了武汉地区 1081 名男性精液质量与 $PM_{2.5}$ 成分的定量暴露反应关系,这是我国第一项探讨 $PM_{2.5}$ 成分中金属元素和水溶性无机离子对精液质量不良影响的流行病学研究。研究结果表明,暴露于 $PM_{2.5}$ 中锑(Sb)、Cd、Pb、Mn、Ni、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 与精子浓度降低显著相关,其中 Mn 暴露也与男性精子总活动率降低有关。此外,分层分析发现不吸烟的人更容易受到 $PM_{2.5}$ 成分暴露的影响,特别是 Sb 和 Cd。该研究首次分析了我国成年男性暴露于 $PM_{2.5}$ 成分对精液质量的潜在影响,为 $PM_{2.5}$ 中某些成分可能会对精液质量产生不利影响提供了参考依据。精子形态也是精液质量的重要参数,该研究未分析 $PM_{2.5}$ 成分与精子形态之间的关系,并且此次研究人群仅包括武汉地区。鉴于 $PM_{2.5}$ 成分的暴露因地区和时间而异,有必要进一步研究以证实在不同人群中该结论的可信性。

5.2 对不良妊娠结局的影响

国外研究证据表明, $PM_{2.5}$ 的化学成分可能对不良妊娠结局产生更大的影响,如早产、死产、低出生体重等。2020 年,复旦大学阙海东团队基于中国大陆 25 个城市中 89 所医院的出生数据分析我国孕妇产前暴露于 $PM_{2.5}$ 及其成分与早产的关系,研究结果表明孕妇产前暴露于 $PM_{2.5}$ 浓度的增加而增加,在妊娠晚期效应值最大;进一步分析 $PM_{2.5}$ 中 6 种主要成分

(BC、OC、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、土壤灰尘)与早产之间的关系发现,BC(孕晚期:27 周~出生)、 SO_4^{2-} (孕晚期和整个孕期)、 NO_3^- (孕晚期和整个孕期)、土壤灰尘(孕早期:1~13 周)对早产影响的估计值与 $PM_{2.5}$ 相当或更高,提示妊娠晚期可能是预防 $PM_{2.5}$ 暴露而导致早产的关键暴露窗口期^[45]。这是第一项将 $PM_{2.5}$ 化学成分产前暴露与早产联系起来的全国性研究,对制定降低 $PM_{2.5}$ 空气污染引起的早产风险的干预措施具有重要意义。

6 小结

大量科学研究证明 $PM_{2.5}$ 多种成分能够对人群健康造成不利影响,其中碳组分(OC、EC、BC)对健康的不良影响证据最为充分,其次是水溶性无机离子(即 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+}),金属与类金属元素的研究相对较少,包括 As、Cd、Cr、Ni、Pb、Zn 等 20 种元素。我国 $PM_{2.5}$ 成分主要包括含碳组分、水溶性无机离子、金属与类金属元素和有机物等,其中碳组分和水溶性无机离子浓度在 $PM_{2.5}$ 总浓度中所占比例高达 50%以上,是 $PM_{2.5}$ 的主要组成部分^[46]。我国 $PM_{2.5}$ 中碳组分(OC 和 EC)不仅在空间分布上呈现出北方城市高于南方城市、内陆城市高于沿海城市的趋势,并且在季节分布上表现出冬高、夏低的季节性趋势^[47]。由于受气候条件、城市发展及地理位置等因素的影响,不同地区 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子也存在显著差异。如,我国重要的工业基地、煤炭重工业城市(武汉、太原等),工业燃煤排放大量的 SO_2 ,以及北方城市(西安、沈阳等)采暖期供暖需求量大,燃烧大量煤炭,导致 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 浓度较高;北京、上海、南京等人口密度大,汽车保有量高的城市中 NO_3^- 的浓度较高;而沿海地区,如深圳、厦门等城市中主要来源于海盐的 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等离子的浓度较高^[47]。我国多数城市中 SO_4^{2-} 表现出夏、秋季浓度高于冬、春季, NO_3^- 呈现冷季(冬、秋季)浓度高于暖季(夏、春季)的趋势,作为生物质燃烧、燃煤排放的标志物的 K^+ 、 Cl^- 浓度在秋冬季较高,而其他水溶性离子季节性差异不明显^[48]。我国 $PM_{2.5}$ 中重金属累积明显,其中 Cu、Pb、Zn 等元素浓度较高,且城区 $PM_{2.5}$ 中重金属浓度高于郊区。 $PM_{2.5}$ 中不同金属元素浓度最高值和最低值出现的城市各不相同,其中 As、Cd、Cr、Ni、Pb、Zn 元素浓度分别在西安、广州、武汉、天津、广州较高,整体而言我国 $PM_{2.5}$ 中重金属综合区域分布特征表现出西北>华中>华南>华北>东北>西南>华东的趋势;受

气候、人类活动等各种因素的影响,PM_{2.5}中多数重金属元素都表现出冬、秋季较高,夏、春季较低的季节分布趋势^[49-50]。

PM_{2.5}化学成分对人群健康的影响主要体现在对呼吸系统疾病、心血管系统疾病、生殖发育系统的损害以及对人体生理指标或生物标志物的影响。例如,OC、EC、Cl、K等与冠心病死亡率增加显著相关,BC、SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺会增加癌症死亡率,EC、SO₄²⁻、NO₃⁻是导致COPD患者肺功能下降的主要原因,OM、NO₃⁻、NH₄⁺与心血管疾病亚临床指标相关,Sb、Cd、Pb、Mn、Ni、SO₄²⁻和NH₄⁺会造成男性精子质量浓度降低,BC、OC、NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺与孕产妇不良妊娠结局密切相关,OC、EC、BC、Cu、Cd、Ni、Zn可能与抑郁和焦虑症状的发生有关。本文通过回顾与综述我国PM_{2.5}及其成分对人群死亡效应、发病情况以及生殖发育等的影响,发现目前国内对PM_{2.5}及其成分的相关研究已日趋成熟,但是由于其成分和来源的复杂性以及监测数据质量的差异性,同时鉴于国内研究大气PM_{2.5}对人群健康影响效应评价指标较为单一,以致部分研究成果较国际先进水平还有一定差距。主要表现在以下四个方面:(1)既往关于大气PM_{2.5}化学成分对人群死亡效应和发病效应的研究主要集中在短期暴露,而对中长期暴露的研究相对较少;(2)我国对大气PM_{2.5}成分对人群健康影响的研究主要集中于北京、上海、广州、西安等城市,而太原、石家庄、济南、郑州等PM_{2.5}污染较为严重的地区关于这方面的研究十分有限;(3)多数城市缺乏PM_{2.5}成分浓度长期监测数据,在运用空气质量(Community Multiscale Air Quality, CMAQ)模型预测PM_{2.5}组分浓度来估算其对健康的影响时,排放数据的不确定性、不完善的模型参数化以及网格分辨率的影响均可能导致预测中的一些偏差;(4)对于某些与不良健康结局存在显著关联的元素(如V、Si等)并未进行确定性测量及分析;(5)多数研究未对PM_{2.5}成分进行正式的来源解析,无法确定对PM_{2.5}与不良健康结局之间的关联做出最大贡献成分的来源。今后需进一步完善PM_{2.5}成分监测体系,扩大研究范围,纳入高质量监测数据,建立大气污染人群健康效应综合评估体系,为有效降低大气PM_{2.5}污染对人群健康危害提供技术支撑。

参考文献

- [1] AI S, QIAN ZM, GUO Y, et al. Long-term exposure to ambient fine particles associated with asthma: a cross-sectional study among older adults in six low- and middle-income countries[J]. *Environ Res*, 2019, 168: 141-145.
- [2] DOMINICI F, PENG RD, BELL ML, et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases[J]. *JAMA*, 2006, 295(10): 1127-1134.
- [3] LIN H, LIU T, XIAO J, et al. Mortality burden of ambient fine particulate air pollution in six Chinese cities: results from the Pearl River Delta study[J]. *Environ Int*, 2016, 96: 91-97.
- [4] MORAKINYO OM, MOKGOBU MI, MUKHOLA MS, et al. Health outcomes of exposure to biological and chemical components of inhalable and respirable particulate matter[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2016, 13(6): 592.
- [5] ACHILLEOS S, KIOUMOURTZOGLOU MA, WU CD, et al. Acute effects of fine particulate matter constituents on mortality: a systematic review and meta-regression analysis[J]. *Environ Int*, 2017, 109: 89-100.
- [6] BASAGAÑA X, JACQUEMIN B, KARANASIOU A, et al. Short-term effects of particulate matter constituents on daily hospitalizations and mortality in five South-European cities: results from the MED-PARTICLES project[J]. *Environ Int*, 2015, 75: 151-158.
- [7] OSTRO B, TOBIAS A, KARANASIOU A, et al. The risks of acute exposure to black carbon in Southern Europe: results from the MED-PARTICLES project[J]. *Occup Environ Med*, 2015, 72(2): 123-129.
- [8] FERREIRA TM, FORTIM C, DE FREITAS CU, et al. Effects of particulate matter and its chemical constituents on elderly hospital admissions due to circulatory and respiratory diseases[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2016, 13(10): 947.
- [9] KRALL JR, MULHOLLAND JA, RUSSELL AG, et al. Associations between source-specific fine particulate matter and emergency department visits for respiratory disease in four U. S. cities[J]. *Environ Health Perspect*, 2017, 125(1): 97-103.
- [10] BEELEN R, HOEK G, RAASCHOU-NIELSEN O, et al. Natural-cause mortality and long-term exposure to Particle components: an analysis of 19 European cohorts within the multi-center ESCAPE Project[J]. *Environ Health Perspect*, 2015, 123(6): 525-533.
- [11] LIN H, TAO J, QIAN ZM, et al. Shipping pollution emission associated with increased cardiovascular mortality: a time series study in Guangzhou, China[J]. *Environ Pollut*, 2018, 241: 862-868.
- [12] CHUNG Y, DOMINICI F, WANG Y, et al. Associations between long-term exposure to chemical constituents of fine particulate matter (PM_{2.5}) and mortality in medicare enrollees in the eastern United States[J]. *Environ Health Perspect*, 2015, 123(5): 467-474.
- [13] CROUSE DL, PHILIP S, VAN DONKELAAR A, et al. A new method to jointly estimate the mortality risk of long-term exposure to fine particulate matter and its components[J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 18916.
- [14] PENG RD, BELL ML, GEYH AS, et al. Emergency admissions for cardiovascular and respiratory diseases and the chemical composition of fine particle air pollution[J]. *Environ Health Perspect*, 2009, 117(6): 957-963.
- [15] CAO J, XU H, XU Q, et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city[J]. *Environ Health Perspect*, 2012, 120(3): 373-378.
- [16] HUANG W, CAO J, TAO Y, et al. Seasonal variation of chemical species associated with short-term mortality effects of PM_{2.5} in Xi'an, a central city in China[J]. *Am J Epidemiol*, 2012, 175(6): 556-566.
- [17] YANG J, ZHOU M, LI M, et al. Fine particulate matter constituents and cause-specific mortality in China: a nationwide modelling study[J]. *Environ Int*, 2020, 143: 105927.
- [18] LIN H, TAO J, DU Y, et al. Particle size and chemical constituents of ambient particulate pollution associated with cardiovascular mortality in

- Guangzhou, China[J]. *Environ Pollut*, 2016, 208: 758-766.
- [19] WANG Y, SHI Z, SHEN F, et al. Associations of daily mortality with short-term exposure to PM_{2.5} and its constituents in Shanghai, China[J]. *Chemosphere*, 2019, 233: 879-887.
- [20] WANG C, HAO L, LIU C, et al. Associations between fine particulate matter constituents and daily cardiovascular mortality in Shanghai, China[J]. *Eco-toxicol Environ Saf*, 2020, 191: 110154.
- [21] CHEN C, XU D, HE MZ, et al. Fine particle constituents and mortality: a time-series study in Beijing, China[J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(19): 11378-11386.
- [22] CHEN Y, CHEN R, CHEN Y, et al. The prospective effects of long-term exposure to ambient PM_{2.5} and constituents on mortality in rural East China[J]. *Chemosphere*, 2021, 208: 130740.
- [23] HOFFMANN RF, ZARRANTIN S, BRANDENBURG SM, et al. Prolonged cigarette smoke exposure alters mitochondrial structure and function in airway epithelial cells[J]. *Respir Res*, 2013, 14(1): 97.
- [24] WANG YH, LIN YK. Mortality and emergency room visits associated with ambient particulate matter constituents in metropolitan Taipei[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 569-570: 1427-1434.
- [25] 洪也, 张莹, 马雁军, 等. 沈阳市PM_{2.5}离子成分对呼吸疾病门诊数影响研究[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 4697-4705.
- HONG Y, ZHANG Y, MA YJ, et al. Effect of the association between PM_{2.5} and its water-soluble ions and hospital outpatient visits for respiratory diseases in Shenyang City[J]. *China Environ Sci*, 2018, 38(12): 4697-4705.
- [26] GUO P, WU H, CHEN Y, et al. Associations of chemical components of fine particulate matter with emergency department visits in Guangzhou, China[J]. *Atmos Environ*, 2021, 246: 118097.
- [27] CHEN R, QIAO L, LI H, et al. Fine particulate matter constituents, nitric oxide synthase DNA methylation and exhaled nitric oxide[J]. *Environ Sci Technol*, 2015, 49(19): 11859-11865.
- [28] SHI J, CHEN R, YANG C, et al. Association between fine particulate matter chemical constituents and airway inflammation: a panel study among healthy adults in China[J]. *Environ Res*, 2016, 150: 264-268.
- [29] CHEN S, GU Y, QIAO L, et al. Fine particulate constituents and lung dysfunction: a time-series panel study[J]. *Environ Sci Technol*, 2017, 51(3): 1687-1694.
- [30] YANG T, CHEN R, GU X, et al. Association of fine particulate matter air pollution and its constituents with lung function: the China Pulmonary Health study[J]. *Environ Int*, 2021, 156: 106707.
- [31] YUE W, TONG L, LIU X, et al. Short term PM_{2.5} exposure caused a robust lung inflammation, vascular remodeling, and exacerbated transition from left ventricular failure to right ventricular hypertrophy[J]. *Redox Biol*, 2019, 22: 101161.
- [32] 陈晨, 孙志颖, 杜宗豪, 等. 北京市PM_{2.5}化学组分与心脑血管住院风险的时间序列研究[C]//2018环境与健康学术会议——精准环境健康: 跨学科合作的挑战论文汇编. 沈阳: 中国毒理学会, 2018: 236.
- CHEN C, SUN ZY, DU ZH, et al. Fine particle constituents and cardiovascular hospitalization: a time-series study in Beijing, China[C]//2018 Environment & Health Conference-Precise Environmental Health: A Challenge of Interdisciplinary Collaboration. Shenyang: Chinese Society of Toxicology, 2018: 236.
- [33] XU X, HU H, HA S, et al. Ambient air pollution and hypertensive disorder of pregnancy[J]. *J Epidemiol Commun Health*, 2014, 68(1): 13-20.
- [34] PEDERSEN M, STAYNER L, LAMA R, et al. Ambient air pollution and pregnancy-induced hypertensive disorders: a systematic review and meta-analysis[J]. *Hypertension*, 2014, 64(3): 494-500.
- [35] XIA B, ZHOU Y, ZHU Q, et al. Personal exposure to PM_{2.5} constituents associated with gestational blood pressure and endothelial dysfunction[J]. *Environ Pollut*, 2019, 250: 346-356.
- [36] WU S, DENG F, HUANG J, et al. Blood pressure changes and chemical constituents of particulate air pollution: results from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) Study[J]. *Environ Health Perspect*, 2013, 121(1): 66-72.
- [37] WU S, YANG D, WEI H, et al. Association of chemical constituents and pollution sources of ambient fine particulate air pollution and biomarkers of oxidative stress associated with atherosclerosis: a panel study among young adults in Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2015, 135: 347-353.
- [38] WU S, YANG D, PAN L, et al. Chemical constituents and sources of ambient particulate air pollution and biomarkers of endothelial function in a panel of healthy adults in Beijing, China[J]. *Sci Total Environ*, 2016, 560-561: 141-149.
- [39] DU X, ZHANG Y, LIU C, et al. Fine particulate matter constituents and sub-clinical outcomes of cardiovascular diseases: a multi-center study in China[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 759: 143555.
- [40] LIN Z, NIU Y, CHEN R, et al. Fine particulate matter constituents and blood pressure in patients with chronic obstructive pulmonary disease: a panel study in Shanghai, China[J]. *Environ Res*, 2017, 159: 291-296.
- [41] CHEN SY, LIN YL, CHANG WT, et al. Increasing emergency room visits for stroke by elevated levels of fine particulate constituents[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 473-474: 446-450.
- [42] SHEN M, GU X, LI S, et al. Exposure to black carbon is associated with symptoms of depression: a retrospective cohort study in college students[J]. *Environ Int*, 2021, 157: 106870.
- [43] SHI W, LI T, ZHANG Y, et al. Depression and anxiety associated with exposure to fine particulate matter constituents: a cross-sectional study in North China[J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(24): 16006-16016.
- [44] HUANG X, ZHANG B, WU L, et al. Association of exposure to ambient fine particulate matter constituents with semen quality among men attending a fertility center in China[J]. *Environ Sci Technol*, 2019, 53(10): 5957-5965.
- [45] CAI J, ZHAO Y, KAN J, et al. Prenatal exposure to specific PM_{2.5} chemical constituents and preterm birth in China: a nationwide cohort study[J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(22): 14494-14501.
- [46] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 我国典型区域PM_{2.5}化学组分特征及来源解析[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(31): 129-135, 154.
- ZHAO H, ZHENG YF, WU XY, et al. PM_{2.5} chemical component characteristics and source apportionment in our domestic typical areas[J]. *Sci Technol Eng*, 2014, 14(31): 129-135, 154.
- [47] 张晓雨. 中国中东部地区典型城市大气细颗粒物中化学组成特征及来源解析研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- ZHANG XY. Study on chemical characteristics and source apportionments of fine particulates in the typical cities over the central and eastern China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [48] CAO JJ, SHEN ZX, CHOW JC, et al. Winter and summer PM_{2.5} chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. *J Air Waste Manage Assoc*, 2012, 62(10): 1214-1226.
- [49] 汪浪, 杨海龙, 李晓燕. 中国部分省会城市PM_{2.5}中重金属水平及影响因素分析[J]. *环境化学*, 2017, 36(1): 72-83.
- WANG L, YANG HL, LI XY. Analysis of heavy metals contents in PM_{2.5} in some provincial capital cities in China and their affecting factors[J]. *Environ Chem*, 2017, 36(1): 72-83.
- [50] 谭吉华, 段菁春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, 30(2): 145-155.
- TAN JH, DUAN JC. Heavy metals in aerosol in China: pollution, sources, and control strategies[J]. *J Grad Univ Chin Acad Sci*, 2013, 30(2): 145-155.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 王晓宇)